

0732864 - |

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Машонкина Людмила Ивановна

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕ-ЛТР ПОДХОДА  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ХИМИЧЕСКОЙ  
ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия



Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Владимир Павлович Гринин

доктор физико-математических наук, профессор

Всеволод Владимирович Иванов

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Анатолий Михайлович Черепанук

Ведущая организация:

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита диссертации состоится 6 марта 2003 года <sup>8 14 00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

20 декабря 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук



В.В. Орлов

0732864 - 1

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ спектральных линий в звездных спектрах дает мощный метод определения физических параметров звезд. В последние 15 лет произошел значительный прогресс в наблюдательной технике, введены в строй крупные телескопы, оснащенные спектрографами высокого разрешения, и стало возможным для больших выборок звезд получать однородный наблюдательный материал высокого качества. Повышение точности наблюдений стимулирует совершенствование теоретических методов анализа спектров, построение физически более реалистичных моделей атмосфер звезд, рассмотрение формирования спектральных линий с использованием наиболее физически оправданного подхода, основанного на отказе от предположения локального термодинамического равновесия (не-ЛТР подход). Поэтому актуальными являются разработка методики не-ЛТР анализа линий разных атомов и ионов в спектрах звезд и исследование влияния отклонений от ЛТР на определение физических параметров. В данной работе для шести атомов и ионов, BaII, EuII, SrII, MgI, NaI и LiI, разработаны и реализованы методики анализа кинетического равновесия в атмосферах звезд спектральных типов от А до К. Они применены для решения одной из актуальных астрофизических проблем - химической эволюции нашей Галактики. Все химические элементы, начиная с углерода и более тяжелые, составляющие окружающий нас мир и нас самих, образовались в звездах в ходе эволюции Вселенной и галактик как ее составных частей. Химическая эволюция вещества в Галактике изучается на основе теоретических представлений об эволюции галактик, эволюции звезд, о типах ядерных реакций синтеза различных элементов, условиях, необходимых для их протекания, и на основе наблюдательных данных об изменении химического состава вещества Галактики за время ее жизни. Эти наблюдательные данные получают из анализа содержаний элементов у маломассивных ( $M \leq M_{\odot}$ ) звезд с временем эволюции, сравнимым с возрастом Галактики. Среди всех элементов важное место занимают тяжелые элементы ( $Z > 26$ ), образующиеся в процессах нейтронных захватов. Разные элементы и разные изотопы одного элемента синтезируются в различных пропорциях в двух типах реакций, в s- и r-процессах, связанных со звездами с существенно различными массами, а значит, имеющими различное

время эволюции. Из анализа отношений содержаний различных элементов, отношений содержаний различных изотопов одного элемента можно установить относительную роль s- и r-процессов в разные эпохи жизни Галактики и связать эти эпохи со шкалой времени. Для того, чтобы выводы были надежными, содержания элементов должны определяться с точностью не хуже 0.1 dex, но даже для наиболее легко наблюдаемых элементов, бария, европия и стронция, данные, имеющиеся в литературе, характеризуются большими различиями между разными исследованиями и практически в каждом отдельном исследовании большим разбросом содержаний у звезд близкой металличности. Все известные определения сделаны в рамках гипотезы ЛТР. В большинстве работ изучались звезды либо с содержанием железа  $[Fe/H] > -1$ , либо с  $[Fe/H] < -1$ , и анализ элементных отношений проводился без учета принадлежности звезд к определенным типам галактического населения. Поэтому настоятельно необходимы ревизия и уточнение содержаний тяжелых элементов у холодных звезд различной металличности, поиск эволюционных закономерностей в их поведении и установление наблюдательных ограничений на модели химической эволюции Галактики. Прогресс в данной работе по сравнению с предыдущими исследованиями достигается, благодаря использованию спектральных наблюдений высокого разрешения с высоким отношением сигнал/шум; тщательному отбору исследуемых звезд и тщательному определению их параметров; использованию не-ЛТР подхода при рассмотрении формирования спектральных линий исследуемых ионов BaII, EuII и SrII; применению метода синтетического спектра и дифференциального подхода при определении содержаний бария, европия и стронция.

#### Цели работы.

1. Разработка методики анализа кинетического равновесия EuII и SrII в атмосферах звезд; усовершенствование имеющейся в литературе методики для BaII и применение ее к холодным звездам.
2. Анализ механизмов и величины отклонений от ЛТР в атмосферах холодных звезд ( $T_{\text{эфф}} \leq 6500$  K) для LiI, NaI, MgI, SrII, BaII, EuII.
3. Формирование выборки звезд для целей изучения химической эволюции Галактики.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
ИМ. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО  
КАЗАНСКОГО ГОС. УНИВЕРСИТЕТА

сокого качества. Тщательное определение параметров звезд: эффективной температуры  $T_{\text{эфф}}$ , поверхностной силы тяжести  $\log g$ , содержания железа  $[Fe/H]$ , микротурбулентной скорости  $V_{\text{mic}}$ .

4. Определение не-ЛТР содержаний стронция, бария и европия для звезд.
5. Поиск и анализ эволюционных закономерностей в содержаниях элементов.
6. Определение для звезд отношений содержаний четных и нечетных изотопов бария и их анализ, с точки зрения химической эволюции Галактики.

#### Научная новизна работы.

1. Разработаны методики анализа кинетического равновесия EuII и SrII в атмосферах звезд (для SrII совместно с Беяковой Е.В.).
2. Проанализированы механизмы и величина отклонений от ЛТР в атмосферах холодных звезд ( $T_{\text{эфф}} \leq 6500$  K) различной металличности для SrII, BaII и EuII.
3. Для 14 звезд с дефицитом металлов получены наблюдения на 8-м телескопе Южной Европейской обсерватории с использованием эшелле-спектрометра UVES.
4. Определены не-ЛТР содержания стронция, бария и европия для выборки холодных звезд.
5. Разработана методика определения отношения содержаний четных и нечетных изотопов бария из анализа влияния сверхтонкого расщепления на поглощение в резонансной линии BaII  $\lambda 4554$  и получены средние значения этого отношения для звезд гало, толстого диска и тонкого диска.
6. Обнаружены свидетельства различной химической истории звездных населений толстого диска и тонкого диска Галактики из анализа содержаний тяжелых элементов: существование значительных избытков европия относительно железа, уменьшающихся с ростом металличности, и избытков европия относительно бария



у звезд толстого диска; скачкообразное уменьшение отношений  $[Eu/Fe]$  и  $[Eu/Ba]$  при переходе от толстого к тонкому диску; уменьшение отношений  $[Ba/Fe]$  с ростом металличности у звезд толстого диска.

7. Получены наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики из анализа содержаний тяжелых элементов: соотношение вкладов s- и r-процессов в барий, наблюдаемый у звезд толстого диска; величины скачков в отношениях  $[Eu/Fe]$  и  $[Eu/Ba]$  при переходе от толстого к тонкому диску.
8. Показано отклонение отношений  $Eu/Mg$  от солнечного значения у звезд гало.
9. Из анализа наблюдаемых отношений  $Eu/Ba$  и имеющихся в литературе расчетов химической эволюции Галактики получены продолжительность активной фазы формирования гало,  $\sim 1.5$  млрд. лет, и временная шкала формирования толстого диска как интервал между  $\sim 1.1$  и  $1.6$  млрд. лет от начала протогалактического коллапса.
10. Сделан вывод о неполном перемешивании межзвездного газа в течение всей стадии формирования гало, вплоть до эпохи с  $[Fe/H] \sim -1$ .
11. Рассчитано ионизационное равновесие  $EuII/EuIII$  в атмосферах Ar звезд при отказе от предположения ЛТР, что позволило согласовать содержания европия по линиям  $EuII$  и  $EuIII$  для звезды  $\alpha^2 CVn$ .

#### Степень обоснованности полученных результатов и выводов.

Для повышения достоверности результатов не-ЛТР расчетов для каждого из исследованных атомов и ионов проведены тестовые расчеты для проверки чувствительности результатов к неопределенности атомных параметров. Выполнены тестовые не-ЛТР расчеты для  $BaII$  применительно к Веge и для  $NaI$  для нескольких A-F звезд, и получено хорошее согласие с результатами, имеющимися в литературе (Gigas D. // *Astron. Astrophys.* - 1988. - V.192. - P.264; Takeda Y., Takada-Hidai M. //

*Publ. Astron. Soc. Japan.* - 1994. - V.46. - P.395). Обоснованность выводов об обнаружении эволюционных закономерностей в поведении элементных отношений подтверждается высокой внутренней точностью полученных содержаний: для 64 звезд средняя разность не-ЛТР содержаний, полученных по двум линиям  $BaII \lambda 5853$  и  $\lambda 6496$ , равна  $0.00 \pm 0.03$  dex. Скачкообразное уменьшение отношений  $[Eu/Fe]$  и  $[Eu/Ba]$  при переходе от толстого к тонкому диску обнаружено впервые, но ранее аналогичные скачки были найдены для отношений  $Mg/Fe$  и  $O/Fe$  Фурманном (Fuhrmann K. // *Astron. Astrophys.* - 1998. - V.338. - P.161) и Граттоном и др. (Gratton R.G., et al. // *Astron. Astrophys.* - 2000. - V.358. - P.671), и это косвенно подтверждает достоверность полученных результатов. Соотношение s/r-процессов в производстве бария в эпоху толстого диска получено двумя независимыми методами, и значения совпадают в пределах ошибок определения.

Научная, методическая и практическая значимость. Научное значение имеют разработанные и реализованные методики не-ЛТР анализа линий  $SrII$ ,  $EuII$ ,  $BaII$ ,  $LiI$ ,  $NaI$  и  $MgI$  в спектрах звезд, которые могут быть применены для решения самых разнообразных задач, связанных с анализом спектральных линий этих атомов и ионов; анализ механизмов и величины отклонений от ЛТР в зависимости от особенностей структуры атомных термов, атомных параметров и физических условий в атмосфере звезды, который будет полезен всем специалистам в области звездной спектроскопии. Для теории химической эволюции Галактики и эволюции Галактики в целом научное значение имеют полученные впервые из наблюдений ограничения на соотношение r- и s-процессов в нуклеосинтезе и отношение содержаний четных и нечетных изотопов Ba в различные эпохи жизни Галактики; независимое подтверждение немонотонности эволюции Галактики и определение величин скачков в отношениях  $[Eu/Fe]$  и  $[Eu/Ba]$  при переходе от толстого к тонкому диску, которые являются индикаторами продолжительности промежуточной фазы между эпохами активного формирования толстого диска и тонкого диска; полученные свидетельства неполного перемешивания межзвездного газа в эпоху гало.

Полученные в работе результаты могут найти применение во всех астрономических учреждениях, где проводится анализ спектров звезд, в частности, в ИНАСАН, САО РАН, на каф. астрофизики С.-Петербург-



ского университета, Ростовского университета, в КрАО АНУ, ГАО АНУ, а также в зарубежных институтах и обсерваториях.

На защиту выносятся следующие результаты.

1. Разработанные методики не-ЛТР анализа линий BaII, EuII и SrII в звездных спектрах. Анализ механизмов и величины отклонений от ЛТР для BaII, EuII, SrII, NaI, MgI и LiI в атмосферах холодных звезд ( $T_{\text{эфф}} \leq 6500$  K) различной металличности.
2. Не-ЛТР содержания стронция, бария и европия для выборки звезд, включающей 78 звезд в диапазоне  $[\text{Fe}/\text{H}]$  от  $-2.23$  до  $0.25$ .
3. Разработанная методика определения для звезд отношения содержаний четных и нечетных изотопов бария. Полученные для разных галактических населений средние значения этого отношения: близкое к предсказанному для выхода r-процесса,  $54 : 46$ , для выборки звезд гало;  $65 : 35 (\pm 10)$  для звезд толстого диска и близкое к солнечному отношению  $82 : 18$  для звезд тонкого диска.
4. Обнаруженные свидетельства различной химической истории звездных населений толстого диска и тонкого диска Галактики: существование у звезд толстого диска значительных избытков европия относительно бария с величиной  $[\text{Eu}/\text{Ba}]$  между  $0.36$  и  $0.57$  и относительно Fe с отношением  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$  между  $0.25$  и  $0.58$  и систематического уменьшения последнего отношения с ростом металличности при  $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ ; скачкообразное уменьшение отношений  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$  и  $[\text{Eu}/\text{Ba}]$  на  $\approx 0.15$  dex и  $\approx 0.25$  dex, соответственно, при переходе от толстого к тонкому диску; быстрое падение отношений Eu/Fe и Eu/Ba до солнечных у звезд тонкого диска при возрастании металличности до  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ . Выводы о значительном вкладе r-процесса в барий, наблюдаемый у звезд толстого диска: отношение  $r : s \approx 70 : 30$  у звезд с  $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$  и уменьшается до  $50 : 50$  у звезд с наименьшим дефицитом металлов ( $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.3$ ); о приостановке нуклеосинтеза в r-процессе перед началом формирования тонкого диска, что указывает на существование промежуточной фазы задержки звездообразования между эпохой активного формирования толстого диска и эпохой тонкого диска; о доминировании s-процесса в производстве бария в эпоху тонкого диска.

5. Обнаруженные из анализа отношений Eu/Ba и отношений содержаний четных и нечетных изотопов Ba свидетельства доминирования r-процесса в синтезе тяжелых элементов в течение всей стадии формирования гало, вплоть до эпохи с  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ .

6. Обнаруженное у звезд гало отклонение отношений Eu/Mg от солнечного отношения.

Апробация работы. Результаты докладывались на совещаниях РГ "Звездные атмосферы" при Астросовсте РАН (САО РАН, 1992; Киев, 1994; КрАО АНУ, 1998); совещании РГ "Атомные данные для астрофизики" (С.-Петербург, 1995); совещании рабочей группы "Model Atmospheres and Spectrum Synthesis" (Вена, 1995); Собрании Европейского астрономического общества JENAM-2000 (Москва, 2000); Международном коллоквиуме "Atomic and Molecular Data for Astrophysics" (Москва, 2000); Всероссийской астрономической конференции (С.-Петербург, 2001); Конференции, посвященной 100-летию АОЭ (Казань, 2001); Симпозиуме МАС N 210 "Modelling of stellar atmospheres" (Уппсала, 2002); на ежегодных Итоговых конференциях КГУ (1992 - 2002); на семинарах кафедры астрофизики СПбГУ (1995), Института астрономии и астрофизики Мюнхенского университета (1997), Института астрофизики Общества Макса Планка (Гархинг, 2000 и 2002), кафедры астрономии КГУ (1990 - 2002). Стендовые доклады были представлены на XXII и XXIII Генеральных Ассамблеях МАС (Гаага, 1994; Токио, 1997).

Объем работы. Диссертация состоит из Введения, 6 глав, Заключение, Списка литературы, включающего 254 источника, и Приложения. Работа изложена на 282 страницах, включая 185 страниц машинописного текста, 66 рисунков, 25 таблиц, четыре из которых помещены в Приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении (глава 1) обоснована актуальность выбранной темы исследования; сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту; отмечены результаты, полученные впервые.

Глава 2 посвящена методическим вопросам: описанию методики решения не-ЛТР задачи, расчета скоростей ударных процессов; описанию особенностей используемых моделей атмосфер; методики расчета

синтетического спектра.

Все не-ЛТР расчеты в данной работе сделаны с использованием программного комплекса NONLTE3, разработанного Сахибуллиным Н.А. (1983 год, Казанский университет) на основе метода полной линеаризации. За время, прошедшее с момента его создания, расширился круг решаемых задач. Для повышения достоверности получаемых результатов стали использоваться многоуровневые модели атомов. И назрела необходимость модификации отдельных блоков программы NONLTE3. С увеличением количества уровней в модели атома количество переходов, в которых должно быть определено поле излучения, растет как квадратичная функция. Поэтому переход к работе с многоуровневыми моделями атомов не может быть осуществлен простым увеличением размерностей массивов. Автором модифицирована схема совместного решения уравнений переноса и уравнений кинетического равновесия. Наряду с линеаризуемыми и фиксированными переходами введены переходы с перевычисляемыми радиативными скоростями, в которых поле излучения уточняется после каждой итерации путем формального решения уравнения переноса с функцией источников и коэффициентом поглощения, рассчитанными при текущих значениях населенностей уровней. Практически полностью изменен блок расчета непрозрачностей. Коэффициенты поглощения в связанно-свободных и свободно-свободных переходах  $H$ ,  $H^-$ ,  $HeI$ ,  $H_2^+$ , атомов и первых ионов наиболее распространенных химических элементов вычисляются с данными, заложенными Робертом Куруцем в его программах ATLAS9 и WIDTH9. Это сделано для приведения в соответствие с современными программами расчета теоретических спектров, подавляющая часть которых использует именно данные Р.Куруца. Методика учета непрозрачности, обусловленной многочисленными спектральными линиями, является оригинальной, и суть ее сводится к прямому суммированию на каждой задачной частоте коэффициентов поглощения в отдельных спектральных линиях.

В работе делается обзор и дается сравнительный анализ различных теоретических приближений для расчета сечений возбуждения и ионизации электронным ударом для нейтральных атомов и первых ионов. Обсуждается роль неупругих столкновений с атомами водорода в кинетическом равновесии атомов, дается обзор эмпирических опреде-

лений эффективности этих процессов.

При определении параметров звезд и содержаний химических элементов, а также при анализе спектра Солнца, как звезды сравнения, использованы плоскопараллельные и однородные модели атмосфер, рассчитанные по программе MAFAGS, разработанной в Мюнхенском университете в группе профессора Томаса Герена. Конвекция учитывается в соответствии со стандартной теорией пути перемешивания с параметром длины пути перемешивания относительно высоты однородной атмосферы,  $l/H_p = 0.5$ . Непрозрачность рассчитывается с учетом поглощения примерно в 58 млн. атомарных и молекулярных линий; используются функции распределения непрозрачности (ODF), полученные Р. Куруцем. Однако ODF-таблицы Куруца пересчитаны путем масштабирования на  $-0.16$  dex (в логарифмической шкале). Дело в том, что при расчете важной (в атмосферах холодных звезд) компоненты поглощения, обусловленной линиями железа, Куруц использовал в качестве солнечного содержания железа значение  $\log \epsilon_{Fe} = 7.67$ , которое отличается от  $\log \epsilon_{Fe, \odot} = 7.51$ , полученного в последние годы несколькими группами авторов. Здесь и далее используется шкала содержаний, в которой  $\log \epsilon_H = 12$ . В атмосферах холодных звезд основными поставщиками свободных электронов в среду являются легко-ионизуемые тяжелые атомы. У старых звезд Галактики наблюдается избыток элементов, синтезируемых в  $\alpha$ -процессе (O, Mg, Si, Ca), относительно железа, доходящий до  $[\alpha/Fe] \sim 0.4 - 0.5$ . Избыточное электронное давление ведет к заметному ослаблению спектральных линий атомов и ионов доминирующих стадий ионизации. Поэтому при расчете моделей атмосфер конкретных звезд использовались предварительно определенные, наблюдаемые содержания O, Mg и Si.

Не-ЛТР населенности уровней исследуемых атомов, полученные в программе NONLTE3, используются затем в программе SIU (Spectrum Investigation Utilities), разработанной в Мюнхенском университете, для расчета синтетического спектра и сравнения его с наблюдаемым. Исследуемые химические элементы в природе представлены набором изотопов; спектральные линии BaII, EuII и SrII имеют сложную структуру и состоят из набора компонент, обусловленных изотопическими сдвигами и сверхтонким расщеплением уровней у изотопов с нечетным массовым числом. Все эти эффекты учитываются при расчете



синтетического спектра. В работе приводятся параметры компонент исследуемых спектральных линий, и обсуждается точность атомных данных по сверхтонкому расщеплению уровней BaII и EuII. Исследуемые линии BaII и SrII – достаточно сильные, и для них важным является корректный учет ван-дер-ваальсовского уширения. В работе дается обзор теоретических приближений для вычисления константы  $C_6$ .

В главе 3 описывается методика анализа кинетического равновесия BaII, EuII, SrII, NaI, MgI и LiI. Приводятся модели атомов, анализируются механизмы отклонений от ЛТР в атмосферах звезд разной металличности и обсуждается зависимость величины не-ЛТР эффектов от металличности и температуры. Для исследуемых линий BaII, EuII и SrII приводятся результаты эмпирического уточнения их атомных параметров из анализа профилей линий в солнечном спектре. Здесь же делается краткий обзор имеющихся в литературе не-ЛТР исследований других атомов (Cl, NI, OI, AlI, KI, CaI, FeI) в атмосферах холодных звезд.

Модель атома бария включает все состояния BaII с главным квантовым числом  $n \leq 12$  и орбитальным моментом  $l \leq 4$  и основное состояние BaIII, всего 36 уровней. Для термов  $5d^2D$  и  $6p^2P^o$  учтено тонкое расщепление. В атмосферах K - F звезд BaII является доминирующим ионом, поэтому механизм отклонений от ЛТР связан, в основном, с радиативными процессами в связанно-связанных ( $b - b$ ) переходах. Неравновесное заселение уровней вызвано радиативной накачкой из основного состояния  $6s$  и низковозбужденных уровней  $5d$  и  $6p$  в тех слоях и в тех переходах, где уже не сохраняется детальный баланс, но оптическая толщина в центре соответствующей спектральной линии еще больше 1, и опустошением при спонтанных переходах в слоях, прозрачных для излучения в соответствующих спектральных линиях. Вследствие смещения глубин формирования линий BaII при изменении содержания бария величина и знак не-ЛТР эффектов зависят от содержания бария, которое коррелирует с общим содержанием металлов  $[M/H]$ . У звезд с нормальной металличностью и небольшим дефицитом металлов не-ЛТР эффекты усиливают линии BaII, возникающие с основного ( $6s$ ) и метастабильного ( $5d$ ) уровней, и не-ЛТР поправки к содержанию  $\Delta_{NLTE}$  – отрицательны; у звезд малых метал-

личностей, наоборот, линии BaII ослаблены по сравнению со случаем ЛТР, и  $\Delta_{NLTE} > 0$ . Металличность, при которой не-ЛТР эффекты меняют знак, зависит от звездных параметров и находится в интервале  $[M/H]$  от  $-1$  до  $-2$ .

Эффективность неупругих столкновений с атомами H в кинетическом равновесии BaII оценивается эмпирическим путем, из анализа профилей линий в солнечном спектре. Для BaII рассмотрены три слабооблендрованные линии  $\lambda 4554$ ,  $\lambda 5853$  и  $\lambda 6496$ , и показано, что эти процессы играют пренебрежимо малую роль в кинетическом равновесии BaII. Все последующие не-ЛТР расчеты линий BaII выполнены без учета столкновений с атомами H. Удовлетворительное описание солнечных профилей всех трех линий достигается при одном и том же значении содержания бария  $\log \epsilon_{Ba, \odot} = 2.21$ , согласующемся с метеоритным значением  $\log \epsilon_{Ba, met} = 2.22$  из недавней компиляции Гревессы и др. (Grevesse N., et al. // ASP Conf. Ser. - 1996. - V.99. - P.117), и микротурбулентной скорости  $V_{mic} = 0.8 - 0.9 \text{ км с}^{-1}$ . Используются силы осцилляторов из работы Виза и Мартина (Wiese W.L., Martin G.A. Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions. Part II. NSRDS - NBS 68. - Washington, D.C., 1980).

Для исследованного диапазона параметров,  $T_{эфф} = 5000 - 6500 \text{ К}$ ,  $\log g \geq 3$ ,  $[M/H] = (-2.5) - 0$ , не-ЛТР поправки к содержанию могут принимать значение от  $-0.25 \text{ dex}$  до  $0.2 \text{ dex}$  для субординатной линии  $\lambda 6496$  (переход  $5d - 6p$ ); от  $-0.05 \text{ dex}$  до  $0.3 \text{ dex}$  для резонансной линии  $\lambda 4554$ ; для  $\lambda 5853$  (переход  $5d - 6p$ ) во всех случаях  $|\Delta_{NLTE}| < 0.1 \text{ dex}$ .

Модель атома стронция включает все уровни SrII с  $n \leq 12$ ,  $l \leq 4$  и основное состояние SrIII, всего 41 уровень. Для термов  $4d^2D$  и  $5p^2P^o$  учтено тонкое расщепление. Структура термов SrII подобна структуре термов BaII, и для обоих ионов действуют одни и те же механизмы отклонений от ЛТР. Для резонансных линий  $\lambda 4077$  и  $\lambda 4215$  так же, как и в случае линий BaII, величина и знак не-ЛТР эффектов зависят от металличности. Металличность, при которой происходит смена знака, смещена по сравнению с соответствующей величиной для линий BaII в сторону более низких  $[M/H]$  и находится в интервале от  $-2$  до  $-2.5$ . У звезд с  $[M/H] > -2$  не-ЛТР эффекты усиливают резонансные линии SrII, и не-ЛТР поправки к содержанию – отрицательны; у звезд с большим дефицитом металлов, наоборот, ослабляют по сравне-



нию со случаем ЛТР, и  $\Delta_{\text{NLTE}} > 0$ . Еще одна линия SrII  $\lambda 4161$  (переход  $5p - 6s$ ), используемая при определении содержаний, во всем диапазоне параметров ослаблена по сравнению со случаем ЛТР.

Для эмпирической оценки эффективности неупругих столкновений с атомами H использованы линии  $\lambda 10327$  и  $\lambda 10914$  мультиплета  $4d - 5p$ . В случае Солнца не-ЛТР поправка  $\Delta_{\text{NLTE}}$  для этих линий может находиться в диапазоне от  $-0.18$  dex до  $-0.35$  dex в зависимости от того, учитываются или нет водородные столкновения. Удовлетворительное описание солнечных профилей этих линий достигается при учете столкновений, но только в том случае, если в формулу Стинбука и Холвегера (Steenbock W., Holweger H. // *Astron. Astrophys.* - 1984. - V.130. - P.319) для вычисления соответствующих скоростей вводится масштабирующий коэффициент  $k_H = 0.01$ . Этот вывод получен для фиксированных значений солнечного содержания стронция  $\log \varepsilon_{\text{Sr}, \odot} = 2.92$ , константы  $C_6$ , основанной на данных из работы Барклема и О'Мары (Barklem P.S., O'Mara B.J. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* - 2000. - V.311. - P.535) и сил осцилляторов из цитированной выше работы Виза и Мартина. Все последующие не-ЛТР расчеты линий SrII выполнены с  $k_H = 0.01$ .

При нормальной металличности не-ЛТР поправка к содержанию для резонансных линий SrII составляет несколько сотых в логарифмической шкале; с уменьшением  $[M/H]$  до  $-1$  она достигает значений  $\sim -0.1$  dex, и при меньших металличностях  $\Delta_{\text{NLTE}}$  сначала уменьшается по абсолютной величине до 0, затем становится положительной и растет. При  $[M/H] = -3$  даже у субкарликов  $\Delta_{\text{NLTE}}$  ( $\lambda 4215$ ) может достигать 0.3 dex. При большом дефиците металлов ( $[M/H] < -2.5$ ) не-ЛТР поправка сильно зависит от  $T_{\text{эфф}}$  и  $\log g$ , так что для выборки звезд с разными параметрами неучет отклонений от ЛТР может привести к разбросу содержаний стронция до 0.6 dex и более. Для субординатной линии  $\lambda 4161$  не-ЛТР поправка растет от  $\approx 0.04$  dex при  $[M/H] = 0$  до 0.1 dex при  $[M/H] = -1.5$ .

В модель атома EuII включены все известные из лабораторных измерений уровни энергии EuII и основное состояние EuIII. Состояния с близкими энергиями были объединены, тонкая структура учитывается частично для термов  $5d^3D^o$  и  $6p^3P$ , и окончательно модель атома состоит из 33 уровней. Тестовые расчеты показали, что отсутствую-

щие высоковозбужденные уровни EuII ( $E_{\text{возб}} > 8$  эв) не влияют заметным образом на кинетическое равновесие EuII в атмосферах звезд, где EuII является доминирующим ионом. В противоположность BaII и SrII, не-ЛТР эффекты ведут к ослаблению исследуемых линий EuII, резонансной линии  $\lambda 4129$  и субординатной линии  $\lambda 6645$  (мультиплет  $5d - 6p$ ), во всем рассмотренном диапазоне металличностей. Отличительная особенность структуры термов EuII - это наличие пары  $5d$  уровней (нонетный и септетный) и пары  $6p$  уровней и меньшее разделение по энергии между  $5d$  и  $6p$ , чем между метастабильными уровнями  $5d$  и основным состоянием. Ион EuII, перешедший из основного состояния в  $6p$ , имеет мало шансов вернуться назад, т.к. он легко попадает в "ловушку", создаваемую цепочкой переходов  $6p^3P \rightarrow 5d^3D^o \rightarrow 6p^3P$  или в противоположном направлении. Это благоприятствует перезаселению  $5d$  и  $6p$  за счет оттока атомов из основного состояния. Функция источников в линиях, возникающих с уровней  $6s$  и  $5d$ , становится больше функции Планка, и линии ослабевают по сравнению со случаем ЛТР.

В случае Солнца не-ЛТР эффекты для линий EuII - малы ( $\Delta_{\text{NLTE}} = 0.04$  dex), поэтому роль неупругих столкновений с атомами H в кинетическом равновесии EuII оценивается лишь приближенно. Во всех не-ЛТР расчетах линий EuII эти процессы учитываются с  $k_H = 1/3$ . Из анализа профиля линии  $\lambda 4129$  в спектре интенсивности от центра диска Солнца получено отношение содержаний изотопов  $^{151}\text{Eu} : ^{153}\text{Eu} = 55 : 45$ , что немного отличается от отношения  $47.8 : 52.2$ , даваемого Камероном (Cameron A.G.W. // *Astrophys. Space. Sci.* - 1982. - V.82. - P.123) для вещества Солнечной системы. По двум линиям,  $\lambda 4129$  и  $\lambda 6645$ , в спектре Солнца как звезды фотосферное содержание европия получается  $\log \varepsilon_{\text{Eu}, \odot} = 0.54$ .

В исследуемом диапазоне параметров не-ЛТР поправка к содержанию по линии EuII  $\lambda 4129$  растет от 0.04 dex при нормальной металличности до  $\approx 0.1$  dex у звезд с дефицитом металлов,  $[M/H] \sim -2$ .

В модель атома NaI включены все уровни с  $n \leq 7$  и  $l \leq 3$  и основное состояние NaII, всего 21 уровень. Для терма  $3p^2P^o$  учитывается дублетная структура. Вследствие низкой энергии ионизации натрия в атмосферах звезд с  $T_{\text{эфф}} \geq 4000\text{K}$  находится преимущественно в ионизованном состоянии, и заселение уровней NaI в сильной степени

зависит от процессов взаимодействия с доминирующей стадией NaI. Ионизационное равновесие NaI/NaII определяется конкуренцией двух процессов: фотоионизацией из основного состояния NaI ультрафиолетовым излучением с  $\lambda \leq 2412 \text{ \AA}$ , которая стремится опустошить это состояние, но которая неэффективна из-за низких сечений ионизации, типичных для щелочных металлов, и рекомбинациями на высоковозбужденные уровни NaI и последующими каскадными переходами на нижележащие уровни, которые стремятся перезаселить эти уровни. У NaI второй тип процессов преобладает над первым в области формирования спектральных линий, концентрация нейтральных атомов натрия оказывается больше равновесной. Поэтому говорят об эффекте "сверхрекомбинации" NaI. Линии NaI, возникающие с основного уровня 3s и первого возбужденного уровня 3p, усилены по сравнению с ЛТР; не-ЛТР поправки к содержанию - отрицательны.

Для 8 линий NaI вычислены не-ЛТР поправки к содержанию в диапазоне параметров  $T_{\text{эфф}} = 4000 - 7000 \text{ K}$ ,  $\log g = 2.0, 3.0$  и  $4.0$ ,  $[M/H] = 0, -1$  и  $-2$ . Не-ЛТР расчеты сделаны с учетом неупругих столкновений с атомами H с масштабирующим коэффициентом  $k_H = 0.1$ , найденным эмпирически из анализа профилей линий NaI  $\lambda\lambda 8183, 8195$  в солнечном спектре. Для  $\lambda\lambda 6154, 6160$  и  $\lambda\lambda 5682, 5688$   $\Delta_{\text{NLTE}}$  невелики у звезд ГП ( $< 0.1$  dex по абсолютной величине), но могут достигать  $0.25$  dex у сверхгигантов. Резонансные линии NaI  $\lambda\lambda 5889, 5895$  используются для определения содержаний, в основном, у звезд с дефицитом металлов. С уменьшением металличности не-ЛТР эффекты в этих линиях растут. При  $[M/H] = -2$  даже у звезд-карликов не-ЛТР поправки превышают  $0.1$  dex по абсолютной величине и могут достигать  $-0.5$  dex при  $T_{\text{эфф}} = 6000 - 6500 \text{ K}$ . Для инфракрасных линий  $\lambda\lambda 8183, 8195$  не-ЛТР эффекты велики уже при нормальной металличности,  $\Delta_{\text{NLTE}} \sim -0.2$  dex,  $-0.3$  dex, а с уменьшением  $[M/H]$  появляется сильная зависимость  $\Delta_{\text{NLTE}}$  от  $T_{\text{эфф}}$  и  $\log g$ .

Модель атома MgI включает все синглетные и триплетные уровни с  $n \leq 9$  и  $l \leq 4$  и основное состояние MgII, всего 50 уровней. Для первого возбужденного состояния триплетной системы  $3p^3P^o$  учитывается тонкая структура. В атмосферах звезд с  $T_{\text{эфф}} \geq 5500 \text{ K}$  магний, подобно натрию, практически полностью ионизован, и, как и в случае NaI, заселение уровней MgI сильно зависит от баланса процессов ионизации-

рекомбинации. Сечения фотоионизации MgI из важных низковозбужденных состояний,  $3p^3P^o$  и  $3p^1P^o$ , примерно на два порядка выше, чем у NaI, поэтому для MgI опустошение этих уровней при фотоионизации доминирует над стоком из континуума при рекомбинации на высоковозбужденные уровни и последующих каскадных переходах. В результате, на глубинах формирования спектральных линий населенности всех уровней MgI меньше, чем равновесные, т.е. MgI обнаруживает эффект "сверхионизации". В исследуемом диапазоне параметров не-ЛТР эффекты ослабляют линии MgI, и не-ЛТР поправки к содержанию - положительны. MgI имеет сложную структуру термов, включающую термы разной мультиплетности, и даже для низковозбужденных уровней разделение по энергии невелико и сравнимо со средней кинетической энергией электронов, поэтому столкновения эффективно уменьшают не-ЛТР эффекты в спектральных линиях MgI. Для разных линий  $\Delta_{\text{NLTE}}$  не превышают  $0.1$  dex.

Модель атома LiI включает все состояния  $nl$  с  $n \leq 7$ ,  $l \leq 3$  и основное состояние LiII, всего 20 уровней. Тонкое расщепление уровней не учитывалось из-за малого разделения по энергии. Литий относится к группе щелочных элементов, имеет малую энергию ионизации, и в качественном отношении для LiI можно ожидать такие же не-ЛТР эффекты, как и для NaI. Но эти атомы имеют различные атомные параметры. У LiI в механизме отклонений от ЛТР активную роль играет фотоионизация с первого возбужденного уровня 2p, благодаря положению порога ионизации  $\lambda_{\text{thr}}(2p) = 3500 \text{ \AA}$ ; сечения фотоионизации этого уровня больше, чем соответствующие величины для NaI. В глубоких слоях, ниже глубины формирования излучения на  $\lambda \approx 3500 \text{ \AA}$ , LiI испытывает "сверхрекомбинацию" за счет рекомбинации на верхние уровни и каскадных переходов вниз, но выше начинают доминировать фотоионизация с уровня 2p, и LiI оказывается "сверхионизованным". Положение переходного слоя по глубине зависит от параметров модели атмосферы, поэтому величина и даже знак не-ЛТР эффектов в линии LiI  $\lambda 6708$  зависят от  $T_{\text{эфф}}$ ,  $\log g$ , а также от содержания лития.

На основе собственных исследований и обзора литературных данных дается сравнительный анализ механизмов отклонений от ЛТР для различных атомов и ионов, чьи линии наблюдаются в спектрах Солнца и холодных звезд. Это как атомы и ионы доминирующих стадий



ионизации, OI, FeII, SrII, BaII, EuII, так и атомы, чья доля в общей концентрации элемента мала, LiI, NaI, MgI, AlI, KI, CaI, FeI. Если для последних из анализа энергии ионизации уровней и сечений фотоионизации можно предсказать качественное влияние не-ЛТР эффектов на поглощение в спектральных линиях, то для линий доминирующих атомов/ионов только не-ЛТР расчеты могут дать и знак, и величину отклонений от ЛТР. Показано, что не-ЛТР эффекты для слабых линий могут быть больше, чем для сильных; не-ЛТР эффекты могут быть существенно различными у линий одного мультиплета и могут быть разного знака у атомов/ионов разных химических элементов, находящихся в одной стадии ионизации.

В заключение главы 3 делается обзор имеющихся в литературе определений не-ЛТР содержаний кислорода, натрия, магния, алюминия и железа у холодных звезд с различным содержанием тяжелых элементов и применения этих данных для изучения химической эволюции Галактики.

В главе 4 определяются не-ЛТР содержания бария, европия и стронция у исследуемых звезд. Описываются наблюдательный материал и использованные методы определения параметров звезд; обсуждается точность параметров и полученных содержаний.

В работе поставлена цель определить содержания элементов не у максимально возможной выборки звезд, но определить их как можно точнее и понять причины большого разброса содержаний (0.4 dex и более) у звезд близкой металличности, который обнаруживается в большинстве исследований, имеющихся в литературе. Для этого было предпринято следующее.

1. Выборка ограничена звездами главной последовательности или расположенными вблизи нее, чтобы уменьшить методические ошибки, связанные с моделированием атмосфер и теоретических спектров, с определением параметров. В выборку включено несколько субгигантов с дефицитом металлов, но у всех  $\log g \geq 3.12$ . В выборку не включались известные спектрально-двойные звезды и звезды с относительно быстрым вращением, с  $V \sin i > 4 \text{ км с}^{-1}$ .

2. Использовались спектральные наблюдения высокого разрешения и высоким отношением сигнал/шум.

3. Параметры всех звезд, включая звезду сравнения - Солнце, опре-

делены одними и теми же методами. Звезда не включалась в окончательную выборку, если разность значений  $\log g$ , полученных спектроскопически и из параллаксов, измеренных спутником HIPPARCOS, превышала 15%. Этот критерий одновременно контролирует и точность определения эффективной температуры.

4. Для решения поставленных задач нам не нужно знать абсолютные содержания элементов у звезд и даже у Солнца, а важно как можно точнее установить величину изменения содержания в ходе эволюции Галактики, поэтому мы используем дифференциальный подход относительно Солнца и тем самым сводим к минимуму влияние на результаты неопределенностей атомных параметров линий.

5. Формирование исследуемых линий BaII, EuII и SrII рассматривается в отсутствие гипотезы ЛТР.

6. Для уменьшения ошибок, связанных с анализом наблюдаемых спектров, используется метод синтетического спектра.

Выборка включает 78 звезд. Из них 67 звезд выбраны из списков Фурманна (Astron. Astrophys. - 1998. - V.338. - P.161 и препринт Nearby stars of the Galactic disk and halo. II. - Munich, 2000). Спектральные наблюдения для них получены в 1995 - 2001 гг. немецкими коллегами в обсерватории Калар-Альто (Испания) на 2.2-м телескопе с использованием эшелле-спектрометра FOCES. Спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \simeq 60000$  (для большинства звезд) и 40000; сигнал/шум,  $S/N \sim 30 - 50$  вблизи 4120 Å и больше 200 в спектральном диапазоне  $\lambda > 4500 \text{ Å}$ . Еще 11 звезд - это программные звезды, наблюдавшиеся с использованием эшелле-спектрометра UVES на 8-м телескопе VLT2 Европейской Южной обсерватории (Чили) в рамках нашего проекта "Europium in halo stars" (номер проекта - 67.D-0086A); для UVES спектров  $\lambda/\Delta\lambda \simeq 60000$ ,  $S/N \geq 300$ .

Эффективные температуры определялись из анализа профилей балмеровских линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ ;  $\log g$  - двумя методами: из анализа крыльев сильных линий MgI  $\lambda 5172$  и  $\lambda 5183$ , уширенных эффектом сил Ван-дер-Ваальса, и с использованием тригонометрических параллаксов из каталога HIPPARCOS. Относительное содержание железа  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и микротурбулентная скорость  $V_{\text{mic}}$  получены по линиям FeII. Поскольку не-ЛТР расчеты для FeII, имеющиеся в литературе, не обнаруживают заметных не-ЛТР эффектов, то анализ проводился в рам-



ках предположения ЛТР. Точность определения эффективной температуры оценивалась путем сравнения результатов по двум линиям, а также путем сравнения с данными, полученными другими авторами из различных фотометрических индексов:  $\Delta T_{\text{эфф}} = 80\text{K}$ ; точность  $\log g$  - путем сравнения результатов, полученных спектроскопически и из тригонометрических параллаксов:  $\Delta \log g = 0.1$ ; точность  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и  $V_{\text{mic}}$  - как суммарная ошибка, обусловленная разбросом данных по разным линиям FeII и неопределенностью параметров звезд:  $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.1 \text{ dex}$  и  $\Delta V_{\text{mic}} = 0.1 \text{ км с}^{-1}$ . Для 66 звезд из списков Фурманна параметры были определены им самим (для 62 из них) и сотрудниками той же научной группы и опубликованы в цитированных выше работах. Для остальных 12 звезд определения сделаны автором данной работы. Полученные параметры находятся в следующем диапазоне: эффективная температура от 4800 K до 6470 K,  $\log g$  от 3.12 до 4.66 и  $[\text{Fe}/\text{H}]$  от 0.25 до -2.23.

Для звезд с дефицитом металлов одним из параметров модели атмосферы является содержание элементов-доноров свободных электронов (Mg, Al, Si, ...). В главе 4 для 12 звезд определяются с учетом отклонений от ЛТР содержания магния из анализа профилей линий MgI  $\lambda 5528$  и  $\lambda 5711$ . Для остальных звезд выборки содержания магния заимствуются из работ Фурманна. При расчете модели атмосферы конкретной звезды полагалось, что для элементов  $\alpha$ -процесса  $[\alpha/\text{Fe}] = [\text{Mg}/\text{Fe}]$ .

Анализ элементных отношений выполняется с учетом принадлежности звезд к определенным типам галактического населения: тонкому диску, толстому диску, гало. Для каждой звезды идентификация типа населения осуществлялась с использованием четырех критериев, связанных с пространственной скоростью звезды  $V_{\text{рес}}$  и ее компонентами, с отношением содержания магния к железу, с содержанием железа и с оценкой возраста звезды. Звезды толстого диска уверенно отделяются от тонкого диска, несмотря на значительное перекрытие диапазонов металличности у этих типов населения: они характеризуются более высоким значением  $V_{\text{рес}}$ , от  $100 \text{ км с}^{-1}$  до  $200 \text{ км с}^{-1}$ ; избытком магния по отношению к железу с  $[\text{Mg}/\text{Fe}] \simeq 0.4$  и возрастом свыше 9 млрд. лет. Возрасты звезд оценивались по эволюционным трекам. Для разделения звезд гало и толстого диска был использован, фактически, единственный критерий - пространственная скорость. В исследуемой вы-

борке звезды этих типов населения имеют частично перекрывающийся диапазон металличности (от -0.9 до -1.8), близкие значения избытка магния с  $[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim 0.4$ ; и те, и другие звезды являются старыми. К гало были отнесены звезды с  $V_{\text{рес}} > 200 \text{ км с}^{-1}$ . Как и в случае с параметрами звезд, для звезд из списков Фурманна идентификация типа населения была выполнена самим Фурманном, а для звезд с UVES спектрами - автором данной работы.

Содержания бария определялись по двум субординатным линиям BaII  $\lambda 5853$  и  $\lambda 6496$ , для которых эффекты сверхтонкой структуры - пренебрежимо малы, и, следовательно, получаемые результаты не зависят от относительного содержания изотопов бария, которое у звезд с дефицитом металлов может отличаться от солнечного. Применение не-ЛТР подхода и метода синтетического спектра, использование спектров высокого разрешения, наличие в большинстве случаев двух линий позволило добиться высокой внутренней точности результатов. Для 64 звезд, у которых содержания Ba определены по обоим линиям, среднее значение разности не-ЛТР содержаний равно  $0.00 \pm 0.03 \text{ dex}$ . При ЛТР  $\lambda 6496$  дает систематически завышенные содержания, в среднем, на  $0.10 \pm 0.04$ . Суммарная ошибка отношения  $[\text{Ba}/\text{Fe}]$  (ошибки наблюдений, методические ошибки, неопределенность параметров) оценивается как  $\pm 0.05 \text{ dex}$ . Полученные результаты можно суммировать следующим образом.

1. У 13 звезд гало содержание бария либо следует за содержанием железа, либо показывает небольшой дефицит, до  $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -0.14$ .
2. У звезд толстого диска отношения Ba/Fe близки к солнечному значению при  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$  и уменьшаются на  $\sim 0.1 \text{ dex}$  с ростом металличности до  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.3$ .
3. Звезды тонкого диска имеют, в среднем, солнечное содержание бария относительно железа:  $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -0.01 \pm 0.06$ , однако разброс значений  $[\text{Ba}/\text{Fe}]$  у звезд близкой металличности доходит до  $0.3 \text{ dex}$ , что превышает ошибки определения содержаний бария. Показано, что в эпоху тонкого диска отношение  $[\text{Ba}/\text{Fe}]$  растет со временем и полная величина изменения  $\Delta[\text{Ba}/\text{Fe}] \simeq 0.12 \text{ dex}$ . Наоборот, металличность плохо коррелирует с возрастом звезды. Вместе, это объясняет, по крайней мере, частично, почему у

звезд тонкого диска существует большой разброс на зависимости  $[Ba/Fe] - [Fe/H]$ . Рост отношений  $[Ba/Fe]$  со временем у звезд диска отмечался Эдвардссоном и др. (Edvardsson B., et al. // *Astron. Astrophys.* - 1993. - V.275. - P.101), но в данной работе удалось получить величину этого изменения.

Для определения содержаний европия использовалась резонансная линия  $Eu II \lambda 4129$ . Результаты получены для 65 звезд. Для европия ошибка относительных содержаний  $[Eu/Fe]$  оценивается как 0.1 dex и обусловлена, в основном, неопределенностью проведения уровня непрерывного спектра в сильно блендированной области вокруг 4129 Å. Получены следующие результаты.

1. Звезды гало имеют избыток европия относительно железа с отношением  $[Eu/Fe]$  от 0.40 до 0.67, и есть намек на рост величины  $[Eu/Fe]$  с уменьшением металличности.
2. У звезд толстого диска обнаружены значительные избытки европия относительно железа с отношением  $[Eu/Fe]$  между 0.25 и 0.58, причем они показывают регулярное поведение: в интервале  $[Fe/H]$  от -1.5 до -1 отношение  $[Eu/Fe]$  близко к 0.5, при увеличении  $[Fe/H]$  от -1 до -0.28 оно систематически уменьшается.
3. В области перекрывающихся металличностей (от -0.9 до -1.5) отношения  $[Eu/Fe]$  не показывают каких-либо различий между звездами гало и толстого диска.
4. При переходе от толстого к тонкому диску впервые обнаруживается скачкообразное уменьшение содержаний европия на  $\approx 0.15$  dex.
5. У звезд тонкого диска отношение  $[Eu/Fe]$  падает с ростом  $[Fe/H]$  по закону:  $[Eu/Fe] = -0.02(\pm 0.01) - 0.44(\pm 0.04) [Fe/H]$ .

Содержания стронция определялись по 2 линиям  $Sr II \lambda 4215$  и  $\lambda 4161$ . Обе линии сильно блендированы: линия  $Sr II \lambda 4215.539$  Å - сильной линией  $Fe I \lambda 4215.426$  Å и в обоих далеких крыльях - несколькими линиями молекулы CN; линия  $Sr II \lambda 4161.794$  Å находится в красном крыле двух сильных линий,  $Fe I \lambda 4161.488$  Å и  $Ti II \lambda 4161.534$  Å. Кроме того, несколько молекулярных линий CN и  $Si II$  понижают континуум вблизи 4161.8 Å примерно на 5%. Точность определяемых содержаний

стронция зависит от качества описания наблюдаемых асимметричных профилей. В итоге, результаты получены для 48 звезд и для 38 из них по двум линиям. Среднее значение разности не-ЛТР содержаний  $\Delta \log \varepsilon(4215 - 4161) = 0.00 \pm 0.06$  dex. При ЛТР аналогичная величина равна  $0.05 \pm 0.06$  dex. Неопределенность отношений  $[Sr/Fe]$  оценивается как 0.15 dex.

Содержание стронция, в общем, следует за содержанием бария. Для звезд тонкого диска наблюдается разброс значений  $[Sr/Fe]$  до 0.3 dex. Как и в случае бария, существует корреляция  $[Sr/Fe]$  с возрастом звезды: рост отношения  $[Sr/Fe]$  в эпоху тонкого диска составляет 0.14 dex.

У звезд толстого диска можно заметить слабый тренд: рост дефицита стронция с ростом металличности, так что при  $[Fe/H] > -0.5$  отношение  $[Sr/Fe] \approx -0.10$ , и это согласуется с найденным у этих звезд дефицитом бария относительно железа.

У 7 звезд гало значения  $[Sr/Fe]$  удивительно близки между собой со средним значением  $[Sr/Fe] = -0.10 \pm 0.02$ .

Полученные данные сравниваются с определениями содержаний бария, европия и стронция, опубликованными после 1988 года. Показано, что достигнутая реально в данной работе высокая точность определения содержаний позволила обнаружить эффекты и корреляции элементных отношений, которые в других исследованиях теряются на фоне большого разброса данных; впервые обнаружено различное поведение содержаний тяжелых элементов с металличностью у звезд гало, толстого и тонкого диска.

Наша выборка включает две звезды, HD25329 (звезда толстого диска с  $[Fe/H] = -1.84$ ) и HD74000 (звезда гало с  $[Fe/H] = -2.00$ ), отнесенные Карбоном и др. (Carbon D.F., et al. // *Publ. Astron. Soc. Pac.* - 1987. - V.99. - P.335) к звездам, богатым азотом (N-rich), на основе наблюдаемых у них избытков азота с  $[N/Fe] = 0.5$  и 0.9. Оказалось, что эти звезды показывают также аномалии в содержаниях тяжелых элементов: содержания бария и стронция у них выше, чем у звезд близкой металличности, более, чем на 0.2 dex, а содержания европия меньше на  $\approx 0.3$  dex. В то же время полученные для них избытки магния по отношению к железу - типичны для звезд толстого диска и гало. У звезды HD34328 отношения  $[Ba/Fe]$ ,  $[Sr/Fe]$ ,  $[Eu/Fe]$  и  $[Mg/Fe]$  очень похожи на те, что получены для N-rich звезд, и возможно, она



тоже относится к этой группе звезд. Феномен N-rich звезд, вероятно, не связан с общим ходом химической эволюции Галактики, поэтому указанные звезды были исключены из последующего анализа.

В главе 5 предложен метод определения отношения содержаний четных и нечетных изотопов бария у звезд из анализа влияния сверхтонкой структуры (HFS) на поглощение в резонансной линии BaII  $\lambda 4554$ , и получены средние значения этих отношений для звезд гало, толстого и тонкого дисков. Делается оценка соотношения вкладов s- и r-процессов в производство бария в соответствующие эпохи.

Линия BaII  $\lambda 4554$  состоит из набора HFS-компонент, и их относительные интенсивности зависят от отношения содержаний четных и нечетных изотопов бария, even : odd. Это отношение - различно для солнечной смеси изотопов, even : odd = 82 : 18, (Cameron A. // Astrophys. Space Sci. - 1982. - V.82. - P.123) и смеси изотопов, синтезируемых в r-процессе, even : odd = 54 : 46 (Arlandini C., et al. // Astrophys. J. - 1999. - V.525. - P.886). При одном и том же полном содержании бария ширина линии и энергия, поглощаемая в ней, растут с увеличением доли нечетных изотопов. Отсюда вытекает идея метода: если содержание бария у звезды определено по субординатным линиям, то из сравнения наблюдаемого профиля или эквивалентной ширины линии BaII  $\lambda 4554$  с теоретическими, рассчитанными при фиксированном  $\log \epsilon_{\text{Ba}}$ , по разным отношениям even : odd, может быть получена искомая величина. Поскольку анализируется не изменение формы профиля линии, а изменение полной поглощаемой энергии, то наблюдательный материал не обязательно должен иметь сверхвысокое спектральное разрешение, и это - преимущество предложенного метода. Но метод неприменим, если в спектре не может быть измерена из-за слабости или по другим причинам хотя бы одна из субординатных линий, и это - недостаток метода.

Указанием на отклонение у звезды изотопного состава от солнечного является превышение содержания бария, полученного по резонансной линии при солнечном отношении even : odd,  $\log \epsilon(4554)_{\odot}$ , над содержанием по субординатным линиям,  $\log \epsilon(\text{subord})$ . Для каждой конкретной звезды точность определения изотопных отношений - не выше 10%. Особенно это касается звезд гало, у которых субординатные линии слабы, и точность определения содержаний по ним невысокая.

Поэтому был применен статистический подход. Для 20 звезд тонкого диска средняя разность  $\log \epsilon(4554)_{\odot} - \log \epsilon(\text{subord}) = 0.02 \pm 0.04 \text{ dex}$ , т.е., у них изотопный состав бария близок к солнечному. А вот звезды толстого диска (23 звезды) и гало (8 звезд) показывают заметную разность,  $0.07 \pm 0.04 \text{ dex}$  и  $0.11 \pm 0.06 \text{ dex}$ , соответственно. Поэтому для них были определены содержания бария по линии  $\lambda 4554$  также при отношении even : odd = 54 : 46, соответствующем r-процессу. Для звезд гало это позволило согласовать содержания по резонансной линии и по субординатным линиям, их средняя разность составила  $-0.02 \pm 0.06 \text{ dex}$ . Таким образом, у звезд гало изотопный состав бария близок к характерному для r-процесса. Для звезд толстого диска согласие содержаний по разным линиям достигается, в среднем, при even : odd  $\simeq 65 : (35 \pm 10)$ . Отсюда получаем соотношение вкладов s- и r-процессов в наблюдаемый барий, s : r =  $(30 \pm 30) : 70$ .

В главе 6 обсуждаются обнаруженные из наблюдений закономерности в поведении элементных отношений [Eu/Ba], [Eu/Fe], [Eu/Mg] и [Sr/Ba]; свидетельства различной химической истории звездных населений гало, толстого диска и тонкого диска Галактики; оценивается временная шкала формирования гало и толстого диска Галактики; обсуждаются возможные причины наблюдаемого у звезд гало избытка европия по отношению к магнию, возможность оценки соотношения основной и слабой компонент s-процесса в различные эпохи жизни Галактики.

Анализ содержаний элементов, синтезируемых в различных типах ядерных реакций и в звездах с существенно различающимся временем эволюции даст ключ к определению доминирующих механизмов синтеза элементов на разных этапах химической эволюции Галактики и к оценке продолжительности этих этапов. Европий синтезируется, преимущественно, в r-процессе в Сверхновых II типа: для солнечного европия доля r-ядер составляет 94% (здесь и далее все данные о вкладах r- и s-процессов даются, согласно Arlandini C., et al. // Astrophys. J. - 1999. - V.525. - P.886). Согласно современным теоретическим представлениям, за производство европия ответственны наименее массивные из звезд, вспыхивающих как Сверхновые, с массами от 10 до 12  $M_{\odot}$  и временем эволюции  $\sim 20 - 30$  млн. лет. Барий производится как в r-процессе, так и в s-процессе (основная компонента), протекающем на



стадии асимптотической ветви гигантов у звезд с начальными массами  $M = 2 - 4 M_{\odot}$ . Первые s-ядра бария появились в межзвездной среде примерно через 500 млн. лет после начала протогалактического коллапса, следовательно, у звезд, родившихся в более раннюю эпоху, наблюдаемое отношение  $[Eu/Ba]$  должно соответствовать отношению выходов европия и бария в r-процессе,  $[Eu/Ba]_r = 0.70$ . Для солнечного бария отношение вкладов  $s : r = 81 : 19$ . Стронций синтезируется в тех же процессах, что и барий, но некоторый вклад в его производство может вносить слабая компонента s-процесса, связанная с горением гелиевого ядра у массивных звезд ( $M > 10 M_{\odot}$ ). В настоящее время имеется лишь очень приближенное теоретическое описание этого процесса, поэтому важная информация может быть получена из сравнения содержаний стронция и бария у звезд с дефицитом металлов. Железо в небольших количествах производится при взрывах Сверхновых II типа, но большая часть галактического железа синтезирована в менее массивных звездах (Сверхновые I типа,  $M \sim 4 - 8 M_{\odot}$ ). Время задержки начала эффективного производства железа составляет несколько сот миллионов лет. Наконец, еще один элемент, используемый в настоящем исследовании, магний, синтезируется, преимущественно, в  $\alpha$ -процессе в Сверхновых II типа. Теория предсказывает, что выход магния тем больше, чем больше масса звезды-предшественницы Сверхновой.

Анализ содержаний тяжелых элементов, выполненный впервые с учетом принадлежности звезд к гало, толстому диску и тонкому диску, показал, что эпохи формирования каждого из типов галактического населения коррелируют с определенными этапами химической эволюции Галактики. Таким образом, отношения  $[Eu/Fe]$ ,  $[Ba/Fe]$ ,  $[Eu/Ba]$ ,  $[Eu/Mg]$ ,  $[Sr/Ba]$  несут ценную информацию не только об истории нуклеосинтеза, но и об эволюции Галактики в целом.

Для звезд гало получены значительные избытки европия относительно бария с величиной  $[Eu/Ba]$  между 0.31 и 0.67, и не обнаружена никакая-либо корреляция этого отношения с металличностью. Звезды с отношением  $[Eu/Ba]$ , совпадающим в пределах ошибок с  $[Eu/Ba]_r = 0.70$  для r-процесса, свидетельствуют о доминировании Сверхновых II типа в нуклеосинтезе в эпоху их формирования; время их рождения относится к первым 0.5 млрд. лет жизни Галактики. Звезды с меньшей

величиной  $[Eu/Ba]$  обнаруживают начавшееся обогащение межзвездной среды s-ядрами бария. Отношение  $[Eu/Ba] = 0.4$  соответствует примерно равному вкладу s- и r-процессов в наблюдаемый барий, а, согласно расчетам химической эволюции Траваглио и др. (Travaglio C., et al. // *Astrophys. J.* - 1999. - V.521. - P.691), вклад s-процесса в производство бария достиг 50% через  $\approx 1.6$  млрд. лет после начала протогалактического коллапса. Таким образом, продолжительность эпохи формирования гало получается  $\sim 1.5$  млрд. лет.

У 8 звезд гало из 10 с измеренными содержаниями европия обнаружен избыток европия по отношению к магнию со средним значением  $[Eu/Mg] = 0.31 \pm 0.06$  dex, причем величина избытка не коррелирует ни с содержанием железа, ни с эффективной температурой, ни со светимостью, ни с избытком элементов  $\alpha$ -процесса, ни с отношением  $[Eu/Ba]$ . Этот наблюдательный факт невозможно объяснить в рамках существующих однородных моделей химической эволюции Галактики. Неполное перемешивание межзвездного газа обычно связывают с эпохой, соответствующей низким металличностям, но крайней мере с  $[Fe/H] < -2$ . В данной работе изучаются звезды гало с умеренным дефицитом металлов ( $[Fe/H] \geq -1.71$ ), и полученные результаты для отношений  $Eu/Mg$ , а также выводы, сделанные при анализе отношений  $[Eu/Ba]$ , которые указывают на слабую корреляцию металличности со временем, свидетельствуют о недостаточном перемешивании вещества в течение всей эпохи формирования гало.

Наблюдаемые у звезд толстого диска отношения  $[Eu/Ba]$  в узком диапазоне, от 0.36 до 0.57, с намеком на уменьшение этой величины с ростом металличности позволяют сделать вывод о росте вклада s-процесса в производство бария в эту эпоху от 30% до 50%. С использованием цитированной выше модели химической эволюции Галактики получаем, что временная шкала формирования толстого диска соответствует интервалу времени от  $\approx 1.1$  млрд. лет до 1.6 млрд. лет от начала протогалактического коллапса. Наблюдаемое для толстого диска падение величин  $[Eu/Fe]$  с ростом металличности свидетельствует о производстве железа в звездах, менее массивных, чем предшественники Сверхновых II типа, в соответствии с полученной временной шкалой.

При переходе от толстого к тонкому диску обнаружено скачкообразное уменьшение отношения  $[Eu/Ba]$  примерно на 0.25 dex. Выше

отмечалось аналогичное поведение и для отношения  $[Eu/Fe]$ . Это указывает на задержку звездообразования перед началом формирования тонкого диска, когда синтез европия в массивных звездах прекратился, а железо и барий продолжали производиться в эволюционирующих менее массивных звездах. Величины скачков дают способ оценки продолжительности этой промежуточной фазы в эволюции Галактики. Данные о содержаниях тяжелых элементов подтверждают вывод, сделанный Фурманом (Astron. Astrophys. - 1998. - V.338. - P.161) и Граттоном и др. (Astron. Astrophys. - 2000. - V.358. - P.671) из анализа отношений  $Mg/Fe$  и  $O/Fe$ .

У звезд тонкого диска s-процесс становится доминирующим в производстве бария: отношение  $Eu/Ba$  быстро уменьшается до солнечного при возрастании металличности до  $[Fe/H] = 0$ . Рост отношений  $[Ba/Fe]$  со временем указывает на опережающие темпы синтеза бария по сравнению с железом.

Обнаружить вклад слабой компоненты s-процесса в производство стронция из сравнения содержаний стронция и бария у исследуемых звезд не удалось. У звезд гало средняя величина  $[Sr/Ba] = -0.05 \pm 0.06$ . Это намного больше отношения  $[Sr/Ba]_r = -0.50$ , соответствующего r-процессу. Но вклад r-процесса в солнечный стронций определяется с точностью до коэффициента 2 из-за неопределенности вклада слабой компоненты s-процесса. В звездах толстого диска среднее отношение становится  $[Sr/Ba] = 0.05 \pm 0.05$ , и в звездах тонкого диска содержание стронция, в среднем, следует за содержанием бария.

В главе 7 представляются результаты применения разработанных не-ЛТР методик для решения других астрофизических задач.

Для двух химически пеккулярных Ар звезд рассматривается отклонение ионизационного равновесия  $EuII/EuIII$  от равновесного и влияние не-ЛТР эффектов на определение содержания европия. Для решения этой задачи в модель атома  $EuII+EuIII$  включены все известные из лабораторных измерений уровни  $EuII$ , высоковозбужденные ( $E_i > 8.3$  эв)  $nl$  уровни  $EuII$  с  $n = 7 - 10$ ,  $l \leq 3$  и энергиями, вычисленными приближенно, все октетные и секстетные термы электронных конфигураций  $4f$  и  $5d$   $EuIII$  и основное состояние  $EuIV$ . После объединения состояний с близкими энергиями модель атома включает 48 уровней. Не-ЛТР расчеты показали, что в атмосфере более горячей

звезды  $\alpha^2 CVn$  ( $T_{eff} = 11500$  К,  $\log g = 4.0$ )  $EuII$  сверхионизован, линия  $EuII \lambda 6645$  ослаблена по сравнению с ЛТР, и не-ЛТР поправка к содержанию  $\Delta_{NLTE} = 0.43$ ;  $EuIII$  - доминирующая стадия ионизации, линия  $EuIII \lambda 6666$  незначительно усилена по сравнению с ЛТР, и  $\Delta_{NLTE} = -0.10$ . Содержания европия, полученные по линиям разных ионов, удалось согласовать для этой звезды в рамках химически однородной модели атмосферы. В атмосфере более холодной звезды  $\beta$  CrV ( $T_{eff} = 7750$  К,  $\log g = 4.3$ )  $EuII$  является доминирующим ионом. Для химически однородной модели атмосферы не-ЛТР эффекты для  $EuII$  невелики, и, как и при ЛТР, не удастся согласовать наблюдаемые и теоретические эквивалентные ширины линий  $EuII$  и  $EuIII$  при одном и том же содержании европия. Рассмотрена модель атмосферы, включающая слой с повышенным на 4, 5, 6 порядков содержанием европия. Расчеты обнаруживают усиление отклонений от ЛТР для линии  $EuII \lambda 6645$  по сравнению с химически однородной моделью и тенденцию уменьшения расхождений между наблюдениями и теорией.

Для двух других Ар звезд рассмотрено влияние отклонений от ЛТР у  $LiI$  на определение разницы содержаний лития в поверхностных пятнах и вне пятен. Расчеты показали, что при тех параметрах, которые имеют звезды HD 60435 ( $T_{eff} = 8250$  К,  $\log g = 4.5$ ) и HD 83368 ( $T_{eff} = 7750$  К,  $\log g = 4.0$ ), не-ЛТР поправки к содержанию, вычисленные для линии  $LiI \lambda 6708$ , - отрицательны, невелики по абсолютной величине и незначительно изменяются с изменением содержания лития на 1 - 2 порядка: от  $-0.10$  dex до  $-0.16$  dex.

Рассматривается применение не-ЛТР подхода для уточнения величины селективного избытка бария у  $BaII$ -звезд и выяснения его природы. В исследованном диапазоне параметров не-ЛТР эффекты ведут к усилению линий  $BaII \lambda 5853$ ,  $\lambda 6141$  и  $\lambda 6496$ , по которым определялось содержание  $Ba$ , и не-ЛТР поправка к содержанию для разных линий принимает значения от  $-0.07$  dex до  $-0.16$  dex. Увеличение содержания бария на порядок ведет к ослаблению не-ЛТР эффектов на  $0.01 - 0.04$  dex. Таким образом, проблема селективного избытка бария у этих звезд должна решаться с привлечением других механизмов.

В Заключении суммируются результаты, полученные при анализе отклонений от ЛТР для исследованных атомов и ионов, и выводы относительно химической эволюции и эволюции Галактики, в целом,



сделанные при анализе содержаний тяжелых элементов у выборки холодных карликов, принадлежащих различным звездным населением Галактики.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих статьях.

1. Машонкина Л.И., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. Спектральные линии NaI в атмосферах G-карликов в отсутствие ЛТР // Астрон. журн. - 1993. - Т.70. - С.372 - 380
2. Машонкина Л.И. Численный анализ спектральных линий. IV. Эквивалентные ширины линий BaII в спектрах карликов солнечного типа в отсутствие ЛТР // Известия АОЭ. - 1993. - Т.56. - С.23-30
3. Mashonkina L.I., Shimanskaya N.N., Shimansky V.V. A nonLTE Analysis of Procyon Using Kurucz's ATLAS9 Model Atmospheres // в Astrophysical Applications of Powerful New Databases, ASP Conf. Series. - 1995. - V.78. - P.389-394
4. Mashonkina L.I. The Accurate Collisional Cross Sections as Important Input Data in NonLTE Calculations // в Model Atmospheres and Spectrum Synthesis, ASP Conf. Series. - 1996. - V.108. - P.140-153
5. Машонкина Л.И., Бикмаев И.Ф. Определение содержания бария у звезд солнечного типа в отсутствие ЛТР. I. Методика неЛТР вычислений // Астрон. журн. - 1996. - Т.73. - С.109-118
6. Машонкина Л.И., Шиманская Н.Н., Сахибуллин Н.А. Анализ формирования линий MgI у звезд поздних типов в отсутствие ЛТР // Астрон. журн. - 1996. - Т.73. - С.212-220
7. Mashonkina L.I., Zacs L. On the Problem of Selective Enhancement of Barium in the Atmospheres of BaII Stars // Astroph. Space Science. - 1996. - V.236. - P.185-199
8. Mashonkina L.I., Shimanskaya N.N., Shimansky V.V. Laws in Behaviour of NonLTE Effects for the NaI and MgI atoms for K A stars // Odessa Astron. Publ. - 1996. - V.9. - P.78-79
9. Белякова Е.В., Машонкина Л.И. Анализ статистического равновесия иона SrII в атмосферах F, G - звезд // Астрон. журн. - 1997. - Т.74. - С.601-610
10. Mashonkina L., Gehren T., Bikmaev I. Barium abundances in cool dwarf stars as a constraint to s- and r-process nucleosynthesis // Astron. Astrophys. - 1999. - V.343. - P.519-530
11. Машонкина Л.И. Не-ЛТР анализ формирования линий EuII в атмосферах звезд солнечного типа // Астрон. журн. - 2000. - Т.77. - С.630-640
12. Шиманская Н.Н., Машонкина Л.И., Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР эффекты в линиях MgI для звезд разных типов // Астрон. журн. - 2000. - Т.77. - С.599-618
13. Mashonkina L., Gehren T. Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements // Astron. Astrophys. - 2000. - V.364. - P.249-264
14. Машонкина Л.И., Шиманский В.В., Сахибуллин Н.А. Не-ЛТР эффекты в линиях NaI в атмосферах звезд разных типов // Астрон. журн. - 2000. - Т.77. - С.893-908
15. Mashonkina L. Statistical equilibrium of EuII in stellar atmospheres and atomic data needed // в Atomic and Molecular Data for Astrophysics, Proceedings of a colloquium held in Moscow, Russia, 5-6 June 2000. Eds. Kholtygin A.F., Ochkur V.I. - Saint-Petersburg, 2000. - P.63-71
16. Mashonkina L., Gehren T. Heavy element abundances in cool dwarf stars: an implication for the evolution of the Galaxy // Astron. Astrophys. - 2001. - V.376. - P.232-247
17. Shavrina A.V., Polosukhina N.S., Zverko J., Mashonkina L.I., Khalack V., Ziznovsky J., Hack M., Tsymbal V., North P., Vygonec V.V. Lithium on the surface of cool magnetic CP stars. II. Spectrum analysis of HD83368 and HD60435 with lithium spots // Astron. Astrophys. - 2001. - V.372. - P.571-578



18. Машонкина Л.И., Шаврина А.В., Халак В., Полосухина Н.С., Цимбал В., Выговец В. Влияние пятенной структуры линий редкоземельных элементов и не-ЛТР эффектов на оценки содержания лития для двух  $\gamma$ Ar-звезд // Астрон. журн. - 2002. - Т.79. - С.31-37
19. Машонкина Л.И., Рябцев А.Н., Рябчикова Т.А. Силы осцилляторов Eu III и содержание европия в Ar звездах // Письма в Астрон. журн. - 2002. - Т.28. - С.41-55

